引文格式：胡守超,常增亮,何其祎,等. 基于地物地貌的低空无人机测绘智能化航线规划研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 65-68. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.014

基于地物地貌的低空无人机测绘智能化航线规划研究

胡守超[1]，常增亮[1]，何其祎[2]，万国平[3]，叶志伟[2]
（1. 山东电力工程咨询院有限公司，山东 济南 250013； 2. 湖北工业大学，湖北 武汉 430068；
3. 北京正能空间信息技术有限公司，北京 102627）

摘 要：无人机是当前测绘信息采集的重要手段之一，但当前研究中针对传统无人机测绘航线规划的研究较少，针对这一问题，围绕基于地物地貌的航线智能化规划算法进行了研究，提出的算法可以在传统航线的基础上，综合考虑地物和地貌对于航线规划的影响，并对原有航线进行适当的增加或者修改，使其更符合实际作业情况需求，减少补测次数，切实提高数据采集作业效率。通过对多组实际数据的实验结果表明，提出的算法相比于传统的航线规划精度更优，路径规划结果更加细致，航行策略更加合理，明显提高了数据采集效率。

关键词：地物地貌；低空无人机；遥感测绘；航线规划
中图分类号：P231 **文献标志码：**B **文章编号：**1672-4623（2025）02-0065-04

Research on Intelligent Route Planning for Low Altitude Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Surveying and Mapping Based on Terrain Morphology

HU Shouchao[1], CHANG Zengliang[1], HE Qiyi[2], WAN Guoping[3], YE Zhiwei[2]
(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;
2. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
3. Beijing Zhengneng Space Information Technology Co., Ltd., Beijing102627, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAV) currently stand as a pivotal means for the acquisition of surveying and mapping information. However, scant attention has been devoted in contemporary research to the route planning for conventional UAV-based remote sensing cartography. Addressing this problem, we proposed an intelligent route planning algorithm based on terrain morphology. The algorithm advanced herein contemplates the holistic impact of both topography and features on route planning. It introduces refinements to existing routes by judiciously incorporating or modifying them, thereby aligning more closely with the exigencies of practical operational scenarios. This augmentation, in turn, diminishes the need for subsequent re-surveys, thereby substantially augmenting the efficiency of data acquisition operations. Experimental results derived from multiple sets of empirical data prove that the algorithm proposed in this paper exhibits heightened precision in contrast to traditional route planning methodologies. The resultant path planning manifests greater intricacy, and the navigational strategy adopted is notably more judicious, thereby markedly amplifying the efficacy of data acquisition endeavors.

Key words: terrain morphology, low-altitude UAV, remote sensing surveying and mapping, route planning

无人机进行工程测绘任务，需要应对不同的应用场景，满足不同类型的工程需求。无人机航线规划，并非只是设置无人机起点与终点而进行的简单路径规划问题。基于无人机的航线规划，需要在明确航测范围之上，获取测区的航高，通过设计使其满足航线重叠度以及旁向重叠度的航摄作业规范。无人机进行地形测绘，普遍搭载昂贵的5镜头、单反相机[1-4]。对于平坦地形而言，其中的建筑物底部靠近地面和遮挡区域的细节存在纹理丢失、信息缺失的现象，往往需要进行二次数据采集，导致工作量增加[5-7]；对于山地而言因为地形起伏导致影像比例尺差距真大，影响其整体模型精度，因此需要无人机尽可能地仿地形飞行或者分层进行数据采集[8-12]。

1 研究方法

工程中测区范围不规则，除此以外，测区内丰富多样地貌特征，如森林、草地、水域等，均影响着无人机航测的结果。如果在航线规划中能充分考虑与应对，将会大大的减少无人机航测后期需要进行补测、重测的概率。其次，随着倾斜摄影、激光雷达等先进测量技术的不断涌现，野外测绘数据获取手段越来越多，成果形式更加丰富。现今航测规划并没有很好地

第一作者简介：胡守超（1985—），高级工程师，研究方向为电力工程勘测、摄影测量与遥感技术应用，E-mail：hushouchao@sdepci.com。

融合各种测量技术以应对不同的场景、不同类型的工程需要。因此，本项目通过卫星遥感影像分析地面上各类地物地貌的分布情况，结合最新的无人机技术、倾斜摄影及激光雷达等各种先进测量技术，针对不同场景、不同工程，选择合适的无人机作业手段，提供合理航线规划。

本研究主要分成三部分，如图1所示：①智能的测区地形地物分类。②整体的航线规划设计。③特定目标的航线规划补充设计。

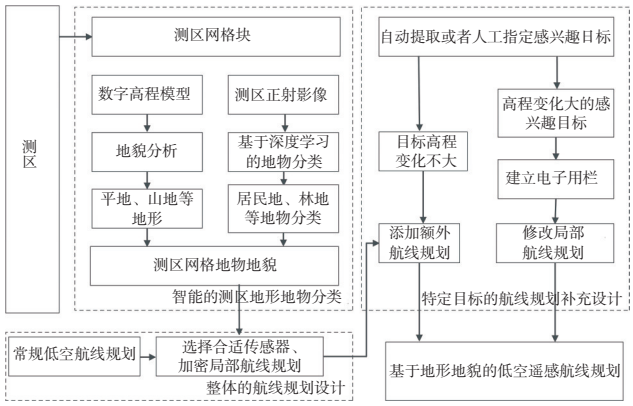


图1 基于地物地貌的无人机低空测绘智慧化航线规划流程图

1.1 智能的测区地形地物分类

通过遥感影像自动分类技术实现项目区域地形地物的分析归类，将测区按林地（茂密/稀疏）、居民地、山地、平丘地等进行分类并统计所占百分比。如前面所述，在进行航线规划以前，不同的地形以及地形上的地物均对于后续三维建模的精度等产生影响，若出现漏测的区域还需要进行二次数据补测，影响整体的作业流程。

对于地形，主要通过对测区DEM进行分析确定其是否为平地、山地或者丘陵。DEM数据获取可以利用ASTER卫星的全球数字表面模型数据。此外对于测区进行分块，计算每个测区块的坡度、坡向、地面曲率、地表起伏度以及地表粗糙度。根据现有的经验分析，如式（1）所示，满足一定阈值即可以划分成不同的地形。对于平地，依据其设定的航测重叠度等作业规范进行格网数据采集，对于山地或者丘陵，则主要采用依据地形进行仿地飞行并进行密集的双网格飞行策略，提高影像数据的数量以及质量。

$$\begin{cases} \text{平地：坡度} < 3° \\ \text{岗丘：相对高度}\Delta H < 100\ \text{m} \\ \text{丘陵：绝对高度}H < 400\ \text{m；相对高度}\Delta H > 100\sim200 \\ \text{低山：绝对高度}H = 400\sim800\ \text{m；相对高度}\Delta H > 200 \\ \text{高山：绝对高度}H > 800\ \text{m；相对高度}\Delta H > 200 \end{cases} \quad (1)$$

除前面所述之外，还需对测区的地物进行分类，在电力工程数据采集中，主要关注电力工程沿线区域是否存在居民区以及林地，居民区如果需要能精准三维建模，需要额外的采集建筑物底部的影像信息，林地则需要获取林地的范围以及树木的高度信息等统计信息，采用深度学习的遥感影像地物分类，利用人工标注的居民、树木影像集，通过获取测区高分辨率遥感影像，进行分块成合适大小，输入进训练好的Faster-RCNN模型中进行检测，检测出建筑，树木以及其他类型，对于成块聚集的建筑物以及树木，绘制其所对应的块状区域作为后续是否进行精细化数据采集的依据之一。

1.2 整体的航线规划设计

估算采用不同作业手段、不同设备时所需内、外业作业时间及人力投入，形成分析报表。通过选择作业手段、作业设备，进行自动航线规划，生成特定无人机可执行的航线文件。

航线规划时应注意，在进行航线规划之前，设置好航向重叠度、旁向重叠度、照片拍摄的触发方式以及无人机飞行速度等必要参数。

在整体航线中，如果需要先考虑不同高度需要进行精细拍摄的建筑物，则将此航线规划问题过度复杂化了。因此，整体的航线规划设计中，应首先考虑地形因素对于航线规划的影响，构建整体的航线规划设计。通过上一步的地形分析，对不同的地形采用不同的航线规划策略。平坦地面主要采用二维格网的方式进行数据采集，对于山区、丘陵地区，则主要从采用仿地航线规划，并采用井字型的航线规划设计，尽量获取足够多的满足精度要求的影像数据，便于后续的测绘实践。

1.3 特定目标的航线规划补充设计

基于激光雷达点云或可见光点云，对特定目标进行精细建模或拍摄，针对不同应用场景形成航线规划方案，进行自动或人工交互航线规划，生成特定无人机可执行的航线文件。

特定的目标，主要存在着2种目标的航线规划设计。即对于密集区域，如居民区或者林地区域，需要获取尽可能多的数据，需要加密航线规划；对于感兴趣的目标区域或者高的建筑等区域，需要额外设计航线，补充现有的航线规划。

密集区域，如居民区需要对该区域的信息进行统计分析，便于后续进行拆迁费用估算等工作，如林地需要关注其高度，便于后续架设电塔时考虑其高度问题等。此外，对于居民区域采用垂直航摄与倾斜航摄结合的方式能很好地进行该区域三维建模等，因

此对于航线规划设计中只需要合理的加密现有的航线，并适当进行垂直航线的设计，尽可能全方位的采集该区域信息，以免后续进行额外的补测影响工程进度。对于特定感兴趣目标或者高的建筑，则需要通过人工交互的方式得到数据，并设置电子围栏，在此基础之上，航线规划的增加并不会如前面所述那种情况，只在一个航线平面上增加航线，而需要通过对高程进行分层，采用逐层航飞的方式获取感兴趣目标或者高建筑等多角度、多高度的数据，进而对其进行精细化建模以及后续的工程应用。此外，此类航线规划，通常需要修改原始的航线规划设计，主要是在截断以往的航线规划路线，只保留以前航线规划中的进入和离开感兴趣目标，或者高建筑的航线，以此作为基础对其进行航线规划。

2　研究区概况

本实验选取了一块典型的测区，测区长度约5.36 km，测区面积约1.68 km^2，最大高差约100 m，采用35 mm相机进行航线规划，需要满足航线重叠度85%，旁向重叠度75%，拍扫间隔1 s,飞行速度10 m/s等参数条件。测区中有平地、山地和丘陵地貌，也存在居民区和林地以及感兴趣的目标等，地形地貌丰富，适合实验本文提出的算法。

3　结果与讨论

3.1　航线规划结果

通过地物地貌分析并航线规划后的整体航线图，其中在居民地区域以及林地区域，航线图进行了加密处理，并且在林地时采用无人机搭载激光雷达传感器进行数据的获取。

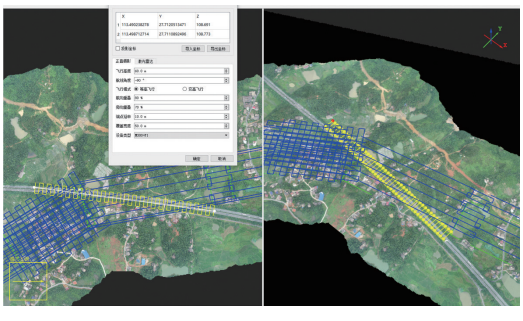


图2　感兴趣的目标--道路的航线规划

如图2所示，通过人工额外的添加了感兴趣的目标道路，通过判断其属于平地且细长状，采用如图中黄色航线进行数据采集。如图3所示，通过人为的添加一个具有一定高层的电子围栏区域，本算法在此的航线规划出现了分层航线，通过选择合理的分层高度，设计了多层次的数据获取航线，确保此区域的数据采集尽可能完善。

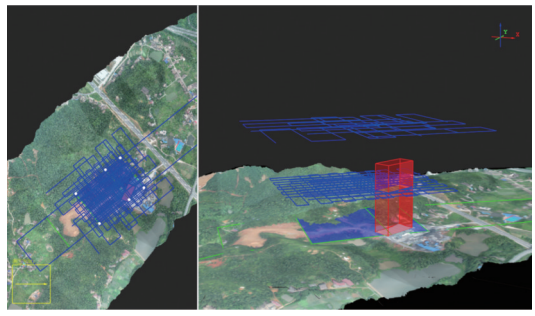


图3　感兴趣的高建筑航线规划设计示意图

3.2　对比实验分析

3.2.1　居民地航线规划与对比分析

本研究选择了在平坦地貌下的居民地进行传统航线规划算法与本文提取的算法的对比实验分析，统计信息如表1所示。

表1　居民地航线规划对比实验分析

参数	传统方法	算法
航高/m	100	100
重叠率/%	65	85
相机幅面	8 192×5 460	8 192×5 460
影像数量	106	220
重建后点云数量	32 928 343	50 968 825
中误差（像素）	0.665 32	0.322 15

其中蓝色线表示其最初的、传统方法设计的航线，因为居民地位于平坦地面上，因此在本文的航线规划中，采用加密其航线，使其航线更加紧密，其中加密的航线采用黄色的航线表示。此外，我们还对其影响数量等进行了对比，经过加密后的三维建模中，点云数量增加了约1/2，重建后的中误差也有原先的0.66像素点提升到0.32像素点，对于居民地的建模更加精细、完整。

3.2.2　丘陵地貌航线规划对比实验

在本小节，选取了典型的丘陵地貌进行航线规划对比实验，实验结果如图4所示，传统航线规划方法，其航线均有一个固定航高，用蓝色线表示其航线规划结果。我们算法通过算法分析，对于丘陵地貌的航线规划，采用仿地飞行策略，其航线与地表存在着相对的航高，用黄色的线表示。通过对比分析，算法获取的影响数量更多，生成的点云更加密集，其中经过平差后本算法的中误差明显优于传统算法。

3.2.3　感兴趣的地物航线规划结果对比分析

感兴趣的地物，特别选了测区中一栋红色的带有尖顶的建筑群，其中传统航线规划获取的图像较少，

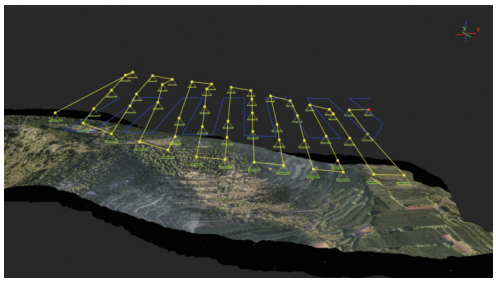
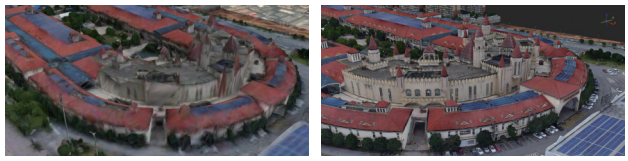


图4 丘陵地貌航线对比实验分析

生成的三维模型质量差，如图5a所示；本文提出的航线规划通过获取其密集的影像，生成的三维重建模型质量高，如图5b所示。



a 传统航线规划三维重建结果 b 本文算法航线规划三维重建结果

图5 航线规划后三维重建的结果对比

3.2.4 整体航线规划结果对比分析

本文对整个测区的一长段航线进行分析，如图6所示，其中蓝色代表传统的航线规划生成的航线，黄色部分代表本文算法生成的航线，其中黄色航线不可见的那一段主要是由于黄色的航线与蓝色的航线重叠在在一起，因为其平坦且没有需要额外进行采集的地物。

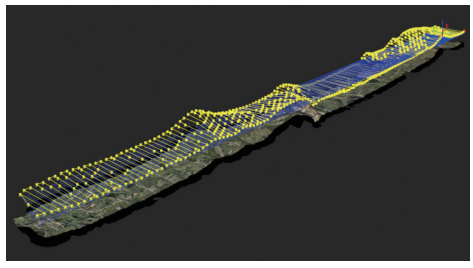


图6 一长段测区对比实验结果图

如表2所示，本文的算法获取的影像数量更多，其平差后的绝对中误差更小，虽然在本算法的航线规划耗时175 min略多于传统航线规划耗时130 min，但是因为本算法的航线规划并没有补测，因此其总体耗时更少。

表2 一长段测区的方向对比耗时分析

影像测量及耗时	传统方法	算法
分辨率	8 192×5 460	8 192×5 460
初始影像数量	1 052	1 591
补测影像数量	325	0
绝对中误差/像素	0.665 32	0.422 15
航测耗时/min	130	175
补测耗时/min	60	0
总耗时/min	190	175

4 结 语

传统航线规划，在面对复杂的地形地物时存在着严重的不足，并不能完整、高效的采集数据。并且传统航线规划单纯针对可见光相机，并没有兼容后续的各类传感器。本文在传统航线规划基础之上提出了基于地形地物的智能化航线规划算法，利用现有的遥感影像和DEM信息，通过智能分类等方式判断测区的不同地形地物，依据其类别的不同选择不同的作业方式，最终准确有效地获取了整个工程测区的相关数据，避免因为漏测等原因进行补测，提高了工程测绘效率。本文通过对不同地形地物的航线规划的对比实验，验证了本算法的有效性和可行性。

参考文献

[1] 王涛,阳利永,曾举,等. 不同航线规划模式下单体建筑物三维建模对比研究[J]. 测绘通报,2019(增刊):298-302

[2] 刘春,曾劲涛,张书航,等. 面向单体异形建筑的无人机单相机实景三维建模[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(4):550-556

[3] Dąbski M, Zmarz A, Pabjanek P, et al. UAV-based Detection and Spatial Analyses of Periglacial Landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica)[J]. Geomorphology,2017,290:29-38

[4] Turner D, Lucieer A, De Jong S M. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)[J]. Remote Sensing,2015,7(2):1 736-1 757

[5] 王庆国,赵海,李健平. 地面激光点云与航空影像相结合的滑坡监测[J]. 测绘通报,2019(4):99-102

[6] Li J, Yao Y, Duan P, et al. Studies on Three-dimensional (3D) Modeling of UAV Oblique Imagery with the Aid of Loop-shooting[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018,7(9): 356

[7] Zang Y, Yang B, Li J, et al. An Accurate TLS and UAV Image Point Clouds Registration Method for Deformation Detection of Chaotic Hillside Areas[J]. Remote Sensing, 2019,11(6):647

[8] 黄海峰,林海玉,吕奕铭,等. 基于小型无人机遥感的单体地质灾害应急调查方法与实践[J]. 工程地质学报,2017,25(2):447-454

[9] 幸茂仁. 无人机电力巡检航迹布设优化方法 [J]. 地理空间信息,2022,20 (10):117-119

[11] 陈飞,崔健,王郑. 垂起固定翼无人机激光雷达的电力巡检应用[J]. 测绘科学,2020,45(12):77-80

[12] 柴香,张帅,周鹏,等. 基于无人机的公路边坡巡检技术研究 [J]. 地理空间信息,2022,20(12):113-116